

岩石の破壊プロセスゾーンモデルの体系化と破壊靱性評価に関する研究

著者	佐藤 一志
号	1540
発行年	1994
URL	http://hdl.handle.net/10097/10347

氏 名	佐 藤 一 志
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 12 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	平成 元 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	岩石の破壊プロセスゾーンモデルの体系化と破壊靱性 評価に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 松木 浩二 東北大学助教授 橋田 俊之

論 文 内 容 要 旨

宇宙、海洋に続く第三のフロンティアとして地下空間が注目されている。地下開発においては地下岩体の力学的特性の把握を基礎とした工学的精密設計が要求されるが、地下岩体とき裂の問題に対しては破壊力学的手法が有効であることが示されている。この破壊力学的手法において柱の一つになるのが地下岩体の破壊靱性評価である。破壊靱性評価法は金属材料を対象に体系化されてきたが、岩石材料はその構成鉱物が一般に脆性材料であるにも関わらず微視き裂の発生に起因した非線形の変形・破壊挙動を示すために新たな手法の開発が要求される。

これまでの岩石及びコンクリートに代表される準脆性材料を対象とした破壊靱性評価に関する研究の結果、破壊靱性値の寸法効果が問題点として指摘されてきている。準脆性材料に寸法効果が現れる主要因はき裂端に形成される破壊プロセスゾーンと呼ばれる非線形領域に起因したき裂進展抵抗の存在であり、破壊プロセスゾーンが試験片寸法に対して無視できない大きさを有するためである。このため、実験室規模の試験で破壊靱性評価を行うには破壊プロセスゾーン形成を考慮した評価が必要である。

破壊靱性評価を目的に巨視的な観点から破壊プロセスゾーン形成を記述するモデルとしてコンクリートを対象に提案されたのが、引張り軟化モデルである。これは、破壊力学で古くから用いられているBarenblatt型の結合力モデルの一種であり、破壊プロセスゾーンを仮想き裂に置き換えこの仮想き裂にき裂開口変位に応じた結合力を与えることにより表現するものである。結合力とき裂開口変位の関係は引張り軟化曲線と呼ばれ、一軸引張り試験により評価される。引張り軟化曲線が決定されれば、仮想き裂先端で応力が有限であるという条件を満たす解として、ある負荷に対する破

壊プロセスゾーン長さや結合力の分布などが求められる。引張り軟化モデルは、モデルが単純で直感的に理解しやすいこと、評価に必要なパラメータが引張り軟化曲線のみであり巨視的な量として測定可能であることが大きな特徴となっている。また、結合力モデルであることから、破壊力学パラメータであるJ積分が容易に計算でき、破壊プロセスゾーン形成が飽和した段階（定常き裂進展段階）に対応する破壊靱性値 J_c が引張り軟化曲線の下面積で与えられることも大きな長所である。しかしながら、岩石の破壊プロセスゾーン評価への引張り軟化モデルの適用は未だ数少なく、巨視的ならびに微視的考察に基づく妥当性に関する検討が急務の課題となっている。

ところで、岩石材料は一般に高い不均質性を有し、この不均質性が微視き裂の発生や破壊プロセスゾーンの形成を生み出している。したがって岩石の破壊プロセスゾーンの理解のためには、不均質性を考慮した統計的な検討が求められるが、このような観点からの定量的研究は少ない。これは、微視的不均質性の取り扱いの困難さのためである。この問題に対して、最近統計物理学の分野で用いられ始めているネットワークモデルの応用が考えられる。ネットワークモデルは、微視組織を棒要素で代表させた平面格子を用いて格子全体の挙動を調べる手法であり、各要素の破壊をき裂の発生に対応させることで多数の微視き裂の発生を含むき裂成長挙動の評価が期待できる。しかしながらネットワークモデルを用いた破壊プロセスゾーン形成に関する検討は、未だ報告されておらず今後の課題となっている。

以上のような背景の下、本研究では岩石の破壊プロセスゾーン評価法の確立を目的として、実験及び数値解析により岩石の破壊プロセスゾーン形成を検討した。具体的には、まず、花崗岩を対象として引張り軟化曲線の評価法を実験により検討した。次に、引張り軟化モデルに基づく破壊挙動シミュレーション法を開発し、計算結果と実験結果を比較することにより引張り軟化モデルの有効性を検討した。さらに、岩石の引張り軟化曲線の予測モデルを引張り軟化曲線の特徴づけることにより実験的に導出した。また、ネットワークモデルを用いて破壊プロセスゾーン形成を調べ、統計モデルに基づく岩石の微視的不均質の評価について検討し、岩石の不均質性の観点から破壊プロセスゾーン形成挙動を検討した。

第2章では、岩石の破壊プロセスゾーンモデルに関する検討のための基礎として、AE法、超音波法を用いて岩石の破壊プロセスゾーンを観察し、破壊プロセスゾーン形成挙動を調べた。破壊プロセスゾーンの観察には飯館花崗岩ならびに東北大理石を用いた。さらに、き裂進展抵抗曲線を調べ、破壊プロセスゾーン形成と巨視的破壊挙動の対応を検討した。

AE法、超音波法を用いた観察結果から、岩石の破壊プロセスゾーンは、初めに微視き裂分散領域が形成され、その後損傷が局所化する過程を経て形成されることを示した。また、破壊プロセスゾーンは局所型と微視き裂分散型に分類できることを示した。さらに、岩石のき裂進展抵抗曲線の観察によりき裂進展抵抗曲線は3通りの場合に分類されることを示し、破壊プロセスゾーン進展条件として局所破壊靱性の必要性を示した。

第3章では、Liによりコンクリートを対象に提案された、J積分を用いて間接的に引張り軟化曲

線を測定する手法であるJ積分法を岩石に適用し、得られた引張り軟化曲線の寸法依存性を調べJ積分法の有効性を検討した。さらに、引張り強さならびに破壊靱性値を比較することにより引張り軟化モデルの有効性を検討した。以上の基礎的検討を踏まえ、局所破壊靱性を考慮して拡張されたJ積分法を局所破壊靱性を有する花崗岩に適用し拡張J積分法の有効性を検討した。なお、寸法依存性の検討には局所破壊靱性の無視できる飯館花崗岩については1.5TCT, 2.5TCT, 4 TCT, 6 TCT, 局所破壊靱性を有する東山花崗岩については1.5TCT, 2.5TCT, 4 TCTの試験片寸法を用いた。

その結果、J積分法により測定された引張り軟化曲線には寸法依存性を生じない試験片寸法範囲が存在し、J積分法を用いることにより小型試験片からも有効な引張り軟化曲線が評価できるを示した。また、J積分法により評価された引張り軟化曲線のピーク値と一軸引張り試験により評価された引張り強さはほぼ一致し、J積分法による引張り軟化曲線評価の妥当性が示された。さらに、種々の破壊靱性試験結果との比較により、引張り軟化モデルを用いることにより実験室規模の破壊靱性試験から大規模き裂進展に対応する破壊靱性値を評価できることを示した。また、局所破壊靱性を有する材料においては、局所破壊靱性を考慮した拡張J積分法により有効な引張り軟化曲線を評価できることを示した。

第4章では引張り軟化モデルに基づく破壊挙動シミュレーションを行った。シミュレーション結果と破壊靱性試験結果を比較することによりシミュレーションの妥当性を検討し、負荷形態の異なる破壊靱性試験及び大型の破壊靱性試験のシミュレーションにより引張り軟化モデルの破壊挙動の予測について検討した。これらの検討結果を踏まえ、拡張J積分法による引張り軟化曲線評価法について検討した。

その結果、J積分法により決定された引張り軟化曲線を用いて同一の破壊靱性試験のシミュレーションを行い、実験結果と比較することにより本計算方法の妥当性を示した。また、負荷形態の異なる破壊靱性試験及び大型の破壊靱性試験のシミュレーション結果と実験結果を比較することにより、引張り軟化モデルに基づく破壊挙動予測の有効性を示すとともに、引張り軟化曲線が材料固有のものであり破壊の構成則として用いることができることを示した。さらに、シミュレーションにより拡張J積分法による引張り軟化曲線評価における局所破壊靱性値の影響を調べ、適切な試験片寸法を採用することにより拡張J積分法によって正確な引張り軟化曲線が測定されることを明らかにするとともに、所定の精度の測定を行うために必要な $\Delta a_0/W$ の上限値を明らかにした。

第5章では、引張り軟化モデルの有効性に関するさらなる検討として、まず、前章の数値シミュレーション結果を用いて破壊プロセスゾーン形成挙動を調べ、これを基に超音波法により評価された破壊プロセスゾーン成長挙動ならびに破壊靱性試験時に計測されたAE放出挙動と比較した。さらに、第3章で調べたJ積分法に関して破壊プロセスゾーン形成挙動の観点から試験片寸法条件について検討した。

その結果、シミュレーション結果を用いて破壊プロセスゾーン形成挙動を調べ、超音波法及び

AE法による実験結果と比較することにより、局所型破壊プロセスゾーン形成が引張り軟化モデルにより近似されることを示した。また、破壊プロセスゾーン形成は試験片寸法に依存することを見だし、単一の破壊力学パラメータによって破壊プロセスが記述される範囲は小規模マイクロクラッキング状態に制限されることを明らかにした。さらに、AE法を用いて決定される破壊靱性値 J_{IAE} は破壊プロセスゾーンの局所化に対応することを示し、これを基に微視破壊挙動と引張り軟化モデルとの関係を明らかにした。また、シミュレーション結果と実験結果をあわせることにより、J積分法を用いて妥当な引張り軟化曲線を決定するための試験片寸法条件を次のように導き出した。

$$\frac{W-a_0}{lps} > 1.1$$

ここに、 lps は初期き裂端で引張り軟化が完了したときの破壊プロセスゾーン長さである。

第6章では、種々の岩石の引張り軟化曲線を無次元化することにより、引張り軟化曲線の予測モデルの実験的導出を試みた。また、岩石の局所型破壊プロセスゾーン評価手順についてまとめた。

種々の岩石の引張り軟化曲線を無次元化することにより唯一の曲線形状で表現されることを見だし、次の引張り軟化曲線の予測モデルを実験結果を基に決定した。

$$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \left[1 - \frac{\delta}{9.3J_c / \sigma_f} \right]^{8.8}$$

この式を用いることにより、簡便に引張り軟化曲線を決定できる。多くの岩石において引張り軟化曲線が一つの曲線で表現されることは、同一の破壊機構の下に引張り軟化が生じていることを示唆している。また、岩石の局所型破壊プロセスゾーンの引張り軟化モデルに基づく評価手順を示した。

第7章では、微視き裂分散型破壊プロセスゾーン形成挙動を岩石の不均質性に注目して調べた。はじめに、ネットワークモデルを用いて岩石の不均質性と破壊挙動の関係を一軸引張りならびにCT試験片について調べた。岩石の不均質性は微視的強度分布として表現した。次に岩石の微視的強度分布を評価するための手法を検討し、いくつかの岩石について適用した。

その結果、ネットワークモデルを用いて岩石の微視破壊挙動を模擬できることをAE測定結果と比較することにより示し、ネットワークモデルを用いたCT試験片のシミュレーション結果から、微視き裂分散領域の広がりや微視的強度分布のワイブル指数 m の間に良い相関があることを示した。さらに、ネットワークモデルのシミュレーション結果から、微視き裂の長さ分布はフラクタル則に従うことがわかった。次に、AE法を用いた微視的強度分布評価法並びにき裂密度と弾性率の関係に基づく評価法を種々の岩石に適用し微視的強度分布のワイブル指数 m を決定した。それによれば、多くの岩石で m は2～5の間にあることがわかった。以上の微視的強度分布により表現された岩石の微視的不均質性に関する検討により、ほとんどの岩種において破壊プロセスゾーンは局所型になると考えられ、引張り軟化モデルに基づく破壊プロセスゾーン評価の有用性が示された。

審 査 結 果 の 要 旨

岩石の破壊力学の基礎を構築する上で、その破壊靱性の評価法の確立は極めて重要である。これまで岩石の変形及び破壊特性の非線形性は、最終破壊以前に多数発生するマイクロクラックに起因するものとされ、破壊プロセスゾーンモデルが提案されているがこの計測・評価手法の点からは未だ不明の点が残されている。

本論文は、岩石の破壊靱性評価のための破壊プロセスゾーンモデルの体系化を目指し、実験ならびに数値シミュレーションを実施し、それらの結果を系統的にまとめたもので全編8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景を述べている。

第2章では、数種類の岩石について破壊靱性試験を実施し、同時にAE計測ならびに超音波音速測定も合わせて行い、破壊プロセスゾーンの局所化について定量的に検討している。さらに破壊プロセスゾーンの局所型、分散型の特徴を明らかにし、これに基づき、き裂進展抵抗曲線を分類している。これは極めて重要な知見と言える。

第3章では、局所型プロセスゾーンの観察された花崗岩についてJ積分に基づく引張り軟化モデルを用いたプロセスゾーン評価法を適用し、破壊靱性の試験片寸法効果を明らかにしている。さらに材料固有の引張り軟化曲線の実験的測定法を完成させている。これは重要な成果である。

第4章および第5章では、第2、3章の結果を踏まえ、境界要素法を用いた破壊靱性試験の数値シミュレーションを行っている。実験的に得られる荷重-変位曲線が、材料固有の引張り軟化曲線を与えることにより数値的に予測できることを示し、さらには破壊プロセスゾーンの形成挙動の定量的評価も可能にしている。この成果は、学術的価値が高いと言える。

第6章では、材料固有として得られる引張り軟化曲線の無次元化を試みこれに成功し、簡便な評価法を提案しているので工学的貢献が大きい。

第7章では、ネットワークモデルによる数値破壊実験によりマイクロクラック分散型プロセスゾンの特徴を説明している。ここでは岩石構成鉱物の不均質性の観点から岩石内部の局所破壊強度を考慮した解析を行い、AE法による微視的破壊強度分布評価法を提案し、プロセスゾーン分散の程度を考察している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、岩石のプロセスゾーン形成挙動に注目した新しい破壊靱性評価法を提案したものであり、機械工学、特に破壊力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。